

## ПЕРВАЯ ПРЕМИЯ

### ПОЛНОМАСШТАБНОЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ НА НАПРАВЛЕННЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ СВЧ

*Шаров В. В., Зейде К. М.*

Уральский Федеральный Университет, Институт радиоэлектроники и  
информационных технологий, Екатеринбург, Россия  
[vadim.sharov9180@mail.ru](mailto:vadim.sharov9180@mail.ru), [k.m.zeyde@urfu.ru](mailto:k.m.zeyde@urfu.ru)

**Аннотация.** Данная работа посвящена экспериментальным исследованиям влияния диэлектрических неоднородностей на электромагнитные волны в линии передачи. Описывается целая серия экспериментов, объединенных одной задачей: развитие новых методов и подходов при изучении, восстановлении параметров и создании новых функциональных материалов. В ходе работы были успешно решены сопутствующие задачи: уточнение волноводного метода измерения электрофизических параметров материалов, верификация экспериментального исследования полуволноводного метода измерения параметров материалов, планирование эксперимента по измерению параметров материалов в свободном пространстве, различимость и резонанс неоднородностей в линиях передачи. Все эксперименты были проведены в диапазоне СВЧ.

**Ключевые слова:** электродинамика, распространение радиоволн, направляемые волны, СВЧ, диэлектрик, планирование и постановка эксперимента.

### FULL-SCALE EXPERIMENTAL STUDY OF THE HETEROGENEITY INFLUENCE ON GUIDED ELECTROMAGNETIC MICROWAVES

*Sharov V., Zeyde K.*

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia  
[vadim.sharov9180@mail.ru](mailto:vadim.sharov9180@mail.ru), [k.m.zeyde@urfu.ru](mailto:k.m.zeyde@urfu.ru)

**Abstract.** This work is devoted to experimental studies of the influence of dielectric inhomogeneities on electromagnetic waves in a transmission line. A series

of experiments is described, united by one aim: the development of new methods and approaches in the study, parameters reconstruction and the creation of new functional materials. During the work, the related tasks were successfully solved: refinement of the waveguide method for measuring the electrophysical parameters of materials, verification of an experimental study of the half-waveguide measuring method, designing of an experiment for measuring the parameters of materials in free space, discernibility and resonance of inhomogeneities in transmission lines. All experiments were carried out in the microwave range.

**Key words:** electrodynamics, propagation, guided waves, microwave, dielectric, experiment

## **ВВЕДЕНИЕ**

В данной работе проводится полномасштабное экспериментальное изучение влияния неоднородностей на распространение направленных электромагнитных СВЧ волн. Актуальность такого изучения заключается в следующем:

- Эффективная различимость неоднородностей в линиях передачи может являться одним из принципов бесконтактной дефектоскопии.
- Восстановление геометрических и электрофизических параметров материалов, является актуальной задачей диагностики, и дистанционного мониторинга.
- Развитие методов валидации экспериментальных данных предоставляет необходимые предпосылки к развитию новых измерительных техник и подходов.
- Методы измерения электрофизических параметров материалов, которые с одной стороны обладают высокой точностью, а с другой стороны не требовательны к форме и состоянию образца материала, могут интенсифицировать развитие существующих и появление новых функциональных материалов, в том числе композитных.

## **ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАБОТЫ**

На рисунке 1 представлена диаграмма научного исследования настоящей работы. Ниже приводятся необходимые пояснения к ней.

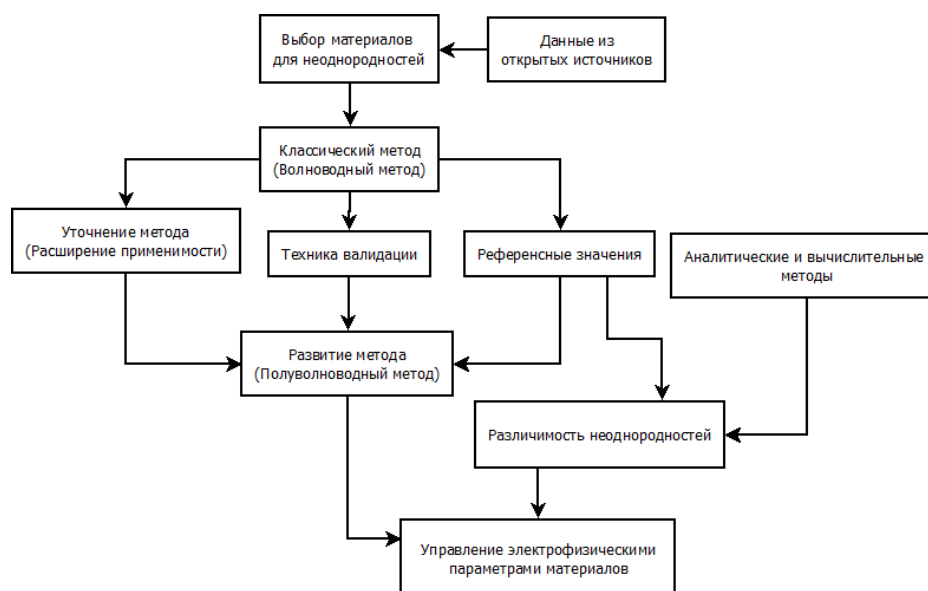


Рисунок 1 – Схема научного исследования

Первым этапом работы является выбор материалов, из которых будут изготавливаться экспериментальные образцы для неоднородностей. При этом, мы руководствовались двумя принципами: во-первых, материалы должны быть общедоступными, стандартными в тех или иных промышленных процессах. Во-вторых, материалы должны быть описаны в открытых источниках литературы – это в свою очередь означает, что материалы не должны быть новыми.

После выборки материалов, мы изготавливаем из них первичные экспериментальные образцы. Первый эксперимент – восстановление электрофизических материалов хорошо известным волноводным способом [1,2]. Проведенное исследование дало три важнейших результата: первый – нам удалось внести ряд существенных уточнений в классический метод восстановления электрофизических параметров материалов, тем самым мы существенно расширили область его применимости. Второй – на основе экспериментальных данных мы разработали технику валидации восстановленных электрофизических параметров [3]. Именно для решения этой задачи, для нас было так важно использовать материалы, описанные в открытых источниках информации. И, наконец, третьим результатом явились полученные референсные значения. Это экспериментально полученные параметры материалов, которые принимаются в рамках всего исследования за эталонные. В этом контексте, референсные значения – это такие значения параметров материалов, которыми описываются конкретные экспериментальные образцы с максимальной достижимой для нас точностью,

тогда как данные из свободных источников являются просто усредненными параметрами не для конкретных образцов, а для материала как такового.

Параллельно с этим мы развили некоторые аналитические и вычислительные методики для решения ряда смежных задач. Среди них: реконструкция классической теории Ми для решения задач дифракции на сфере в свободном пространстве, для ее использования в замкнутом пространстве и реализация численного моделирования возникновения каустических зон при нахождении неоднородности в волноводах.

Основываясь на результатах проведенного экспериментального исследования классическим способом, мы развили новый подход для измерения электрофизических параметров материалов – полуволноводный метод. Основным его преимуществом является то, что форма образца может быть произвольной. Главным недостатком метода является требовательность к вычислительным ресурсам, при восстановлении параметров материала.

Используя референсные значения, а также применяя развитые аналитические и вычислительные методы нам удалось частично решить задачу различимости диэлектрической сферы в прямоугольном волноводе.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

На рисунке 2 представлены все экспериментальные схемы, которые использовались в работе. Так схема на рисунке 2а представляет собой стенд по волноводному методу изучения электрофизических параметров материалов. Разработанная в процессе исследования схема на рисунке 2б – есть полуволноводный (апертурный) метод исследования электрофизических параметров материалов.

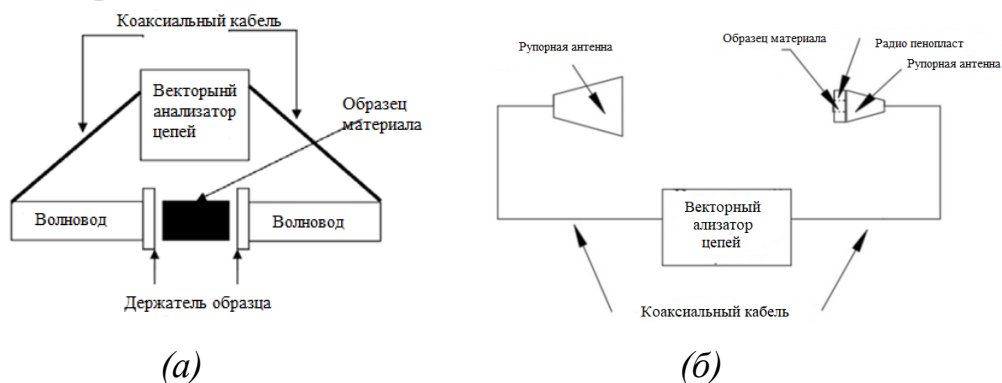


Рисунок 2 – Основные экспериментальные схемы

В работе исследовались следующие материалы: высушенная сосна, парафин, оргстекло, битум, полипропилен и текстолит.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Одним из важных результатов работы, явилось уточнение классического волноводного метода измерения электрофизических параметров материалов. Выбор толщины образца имеет неразрешимую проблему. Из-за того, что диэлектрическая проницаемость объекта неизвестна, невозможно найти  $\lambda_m$  в материале, поэтому оптимальная толщина образца принципиально не определима. Исследование аномального поведения показали, что

$$\epsilon_r^{abn} \approx \left( \frac{c}{2 f_{abn}} \right)^2, \quad (1)$$

где  $\epsilon_r^{abn}$  – действительная часть диэлектрической проницаемости материала на резонансной частоте ( $f_{abn}$ ) для немагнитных объектов ( $\mu_r = 1$ ).

Нам также удалось получить формулу реконструкции коэффициента отражения от сферы в свободном пространстве, для сферы в замкнутом пространстве (волноводе):

$$S = \Delta \cos(\theta), n = 1 - \infty - (2n + 1) (a_w + b - w), \quad (2)$$

где  $S$  – амплитудный коэффициент для замкнутого пространства, определяемый зонами каустик и множественными отражениями. Он является неизвестным коэффициентом, который нужно получить численно. Он связан с многократным переотражением от сферы и ближайшей стенкой волновода. Угол  $\theta$  – угол падения направленной волны на сферу, связанный с дисперсией в волноводе,  $n$  и  $\infty$  – коэффициенты Ми для замкнутого пространства.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выделим основные результаты исследования.

- В ходе выполнения работы удалось усовершенствовать классический волноводный метод измерения электрофизических параметров материалов;
- В ходе выполнения работы удалось развить новый метод измерения электрофизических параметров материалов, который обладает достоинствами волноводных методов и методов измерения в свободном пространстве;

- Удалось решить и верифицировать задачу различимости сферы из сложного диэлектрика, помещенную в прямоугольный волновод.

### **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. K.M. Zeyde "Discernibility of metallic sphere in rectangular waveguide", ACES Conference Proceedings, Italy, 2017.
2. Zeyde K. M. MDR analysis technique for a metallic sphere in the rectangular waveguide // CEUR Workshop Proceedings, Vol. 2035, 2017. pp. 41-45.
3. IEEE Std. 1597.1-2008 'IEEE Standard for Validation of Computational Electromagnetics.